



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 17851

**To cite this version:**

Barus, Matthias and Weleman, Hélène and Collombet, Francis and Nassiet, Valérie and Pastor, Marie-Laetitia and Cantarel, Arthur and Crouzeix, Laurent and Grunevald, Yves-Henri *Comportement thermique d'un joint de colle structural et analyse par thermographie infrarouge : application à la caractérisation de structures composites réparées*. (2017)  
In: Colloque francophone CMOI-FLUVISU, 20 March 2017 - 24 March 2017 (Le Mans, France). (Unpublished)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# COMPOTEMENT THERMIQUE D'UN JOINT DE COLLE STRUCTURAL ET ANALYSE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : APPLICATION À LA CARACTÉRISATION DE STRUCTURES COMPOSITES RÉPARÉES

M. Barus<sup>1</sup>, H. Weleman<sup>1</sup>, F. Collombet<sup>2</sup>, V. Nassiet<sup>1</sup>, M.L. Pastor<sup>3</sup>, A. Cantarel<sup>3</sup>, L. Crouzeix<sup>2</sup>,  
Y.H. Grunevald<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Toulouse, INP ENIT-LGP, Tarbes, France

<sup>2</sup> Université de Toulouse, UT3, Toulouse, France

<sup>3</sup> Institut Clément Ader, IUT de Tarbes, Dpt GMP, Tarbes, France

<sup>4</sup> Composites Expertise & Solutions, Castanet Tolosan, France

matthias.barus@enit.fr

## RÉSUMÉ

Ces travaux abordent la question du Contrôle Non Destructif (CND) par Thermographie InfraRouge (TIR) des réparations par collage structural de stratifiés carbone-époxyde. Les difficultés d'investigation de ce type d'assemblage proviennent du faible contraste de propriétés thermiques entre les différents éléments constitutifs de la réparation. Pour remédier à ce problème, une approche originale visant à modifier les propriétés thermique du joint de colle structural a été mise en œuvre numériquement par le biais d'un modèle par Eléments Finis (EF). La pertinence du comportement thermique identifié a ensuite été validée expérimentalement sur une réparation comportant des défauts de collage représentatif de cas réels.

**MOTS-CLEFS :** *matériaux composites, réparations collées, thermographie infrarouge, comportement thermique*

## 1. INTRODUCTION

L'industrie aéronautique doit faire face depuis de nombreuses années à la problématique du remplacement d'éléments défaillants ou endommagés des aérostructures. Dans le cas des structures primaires, souvent de grandes dimensions, le remplacement intégral du composant détérioré est très onéreux. Les réparations structurales suscitent donc un intérêt croissant et font l'objet de nombreuses recherches. Dans ce contexte, la réparation des structures primaires par collage structural de patchs composites apparaît comme une solution attractive. En effet, ce procédé conduit notamment à une diffusion plus régulière des efforts au sein de la réparation (par rapport à une réparation par patch riveté) et permet de préserver le profil aérodynamique [1, 2]. Pour l'heure, cette technique de réparation n'est toutefois pas certifiée en raison du manque de redondance des éléments de réparation et des difficultés rencontrées vis-à-vis du contrôle non destructif (CND) du joint structural. De plus, dans le cas particulier des composites à base carbone, fort employés dans l'aéronautique, la question du CND du joint structural par Thermographie InfraRouge (TIR) est d'autant plus complexe du fait du faible contraste thermique entre les différents éléments constitutifs de la réparation (patch et parent en carbone-époxyde et joint époxyde).

Pour pallier ce problème, il est donc intéressant d'étudier l'influence du comportement thermique du joint structural, en vue d'une part d'une amélioration de la détection des défauts et plus généralement encore, de la caractérisation de la qualité du joint. Dans ce but, une procédure expérimentale spécifique [3] a été mise en place afin de contrôler la zone d'application du flux thermique ainsi que les conditions aux limites de l'essai (Section 2.). L'utilisation de cette nouvelle procédure permet la mise en place d'une modélisation numérique physiquement consistante du problème thermique (sans facteurs correctifs). Celle-ci a donc servi de support pour simuler et analyser l'intérêt de l'ajout d'additifs au sein de la colle (Section 3.). Enfin, l'apport obtenu quant à la capacité de détection d'un défaut de collage par TIR sera étudié expérimentalement à la Section 4..

## 2. CADRE EXPÉRIMENTAL

Afin de se placer dans un cadre d'étude représentatif du contexte industriel, des éprouvettes réparées en forme de marches d'escalier (step lap) ont été étudiées (Fig. 1-a). Cette configuration de réparation induisant une évolution par palier de la profondeur du joint structural, l'étude de l'impact du comportement thermique du joint collé peut être effectuée pour différentes profondeurs d'investigation. Les assemblages étudiés sont constitués de deux éprouvettes élémentaires composées de 18 plis carbone-époxyde (fibres T300, matrice M10 et drapage  $[0/90/0]_6$ ) menant à une épaisseur totale de 4,7 mm. En outre, pour limiter les risques de délaminage liés à l'utilisation d'un procédé d'usinage conventionnel [4], la géométrie de ces éprouvettes a été obtenue par jet d'eau abrasif. Finalement, la réalisation de la liaison collée a été réalisée par le biais d'une colle époxyde pâteuse (matrice Araldite LY5052 et durcisseur HY5052) appelée par la suite *matrice époxyde* dont l'épaisseur est calibrée à 0,3 mm en utilisant plusieurs feuilles de papier téflonné (chacune d'une épaisseur de 0,1 mm, Fig. 1-b) au niveau des deux marches les plus profondes (n° 1 et n° 2).

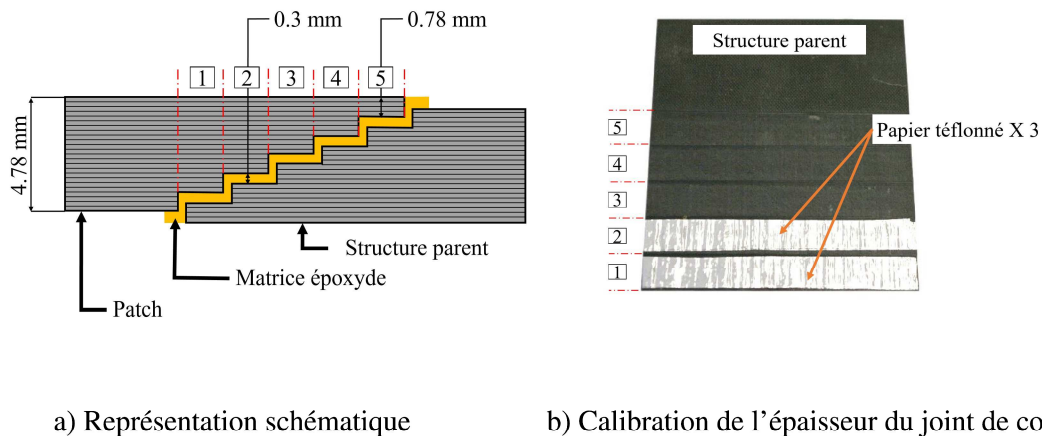


FIGURE 1 : Réparation par collage structural en forme de marche d'escalier (stratifié composite)

Les essais expérimentaux ont été mis en œuvre en employant d'une part une lampe halogène (puissance maximale 1000 W) comme source de stimulation thermique et, d'autre part, une caméra thermique, JADE CEDIP rétrofittée FLIR Titatium SC7000 (capteurs InSb) pour relever les champs thermiques. Il convient toutefois de noter que pour la durée de stimulation ( $t_f = 10$  s) et l'amplitude de la sollicitation thermique ( $500 \text{ W m}^{-2}$ ) employées, le flux thermique ne se propage que jusqu'à la marche n° 3 de la réparation [3]. L'insertion de papier téflonné n'impacte donc pas la réponse thermique du joint de colle. Afin de limiter l'influence de l'environnement extérieur, les données thermiques sont acquises en température relative ( $\Delta T = T(t) - T_0(t = 0)$ ) et la surface étudiée est peinte en noir mat. Cette étude s'appuie enfin sur le nouveau protocole expérimental mis en place dans [3] (Fig. 2) qui vise à la maîtrise des conditions de sollicitation et de mesure. Ainsi, la distribution, la localisation et l'intensité du flux thermique lumineux ainsi que les conditions aux limites sur l'échantillon sont maîtrisées et directement intégrées dans le modèle numérique de la réparation collée.

## 3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU PROBLÈME THERMIQUE

Plusieurs paramètres matériaux peuvent affecter la réponse thermique de la matrice époxyde et par conséquent la faculté de détection d'un défaut de collage par TIR. Toutefois, l'hypothèse que la grandeur thermique la plus affectée par l'ajout d'additifs est la conductivité thermique peut être prise en considération [5]. Afin de faciliter l'étude de l'influence de cette grandeur sur la réponse thermique du

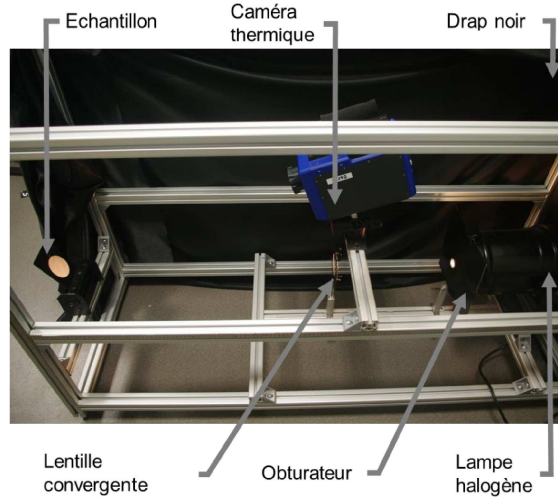


FIGURE 2 : Nouveau banc d'essais thermiques par TIR active

joint, l'assemblage réparé a été modélisé numériquement en utilisant le logiciel ABAQUS ([3], Fig. 3). Ainsi, deux solutions ont été envisagées dans une première approche :

- l'ajout d'additifs de type isolant conduisant à une conductivité thermique 5 fois inférieure à celle de la matrice époxyde (*joint isolant*),
- l'ajout d'additifs de type conducteur conduisant à une conductivité thermique 5 fois supérieure à celle de la matrice époxyde (*joint conducteur*),

la masse volumique  $\rho$  et la chaleur spécifique  $C_p$  étant prises identiques à celle de la matrice époxyde (Tableau 1).

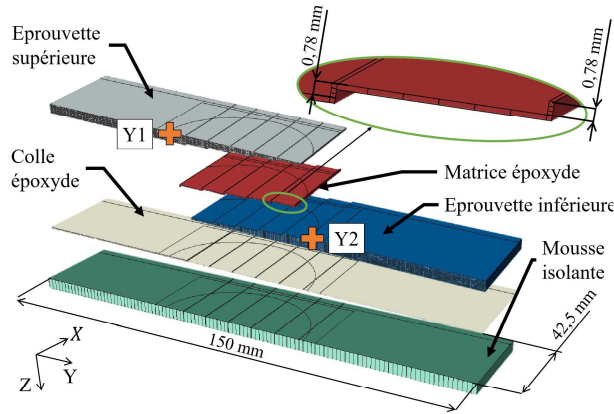


FIGURE 3 : Eléments constitutifs du modèle numérique par éléments finis des éprouvettes réparées

Pour exacerber la visibilité des faibles gradients de température induits par la forte chaleur spécifique du joint de colle, il nécessaire d'introduire la notion de *variations de température relative*

$$\Delta T_2(t) = \Delta T_{\text{matériau réparé}}(t) - \Delta T_{\text{matériau sain}}(t) \quad (1)$$

pour laquelle les variations de température  $\Delta T$  correspondent respectivement à l'éprouvette réparée et à l'éprouvette saine (mêmes dimensions et propriétés) au même instant  $t$  [3].

Les résultats obtenus suite à cette simulation sont représentés à la Fig. 4, à l'instant  $t = t_f$  correspondant à la fin de la phase de chauffe. Les variations de température relative  $\Delta T_2(t_f)$  sont relevées le



	Masse volumique $\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	Conductivité thermique $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Chaleur spécifique $C_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Matrice époxyde	1172 <sup>m</sup>	0,226 <sup>m</sup>	1371 <sup>m</sup>
Joint isolant	1172	0,045	1317
Joint conducteur	1172	1,13	1317

TABLE 1 : Propriétés utilisées pour simuler les comportements isolant ou conducteur du joint structural (m : mesures)

long d'un profil de mesure vertical Y1-Y2 (Fig. 3). Les droites Y1 et Y2 correspondent aux limites de la zone d'application du flux thermique tandis que les points 1 à 5 désignent les différentes marches de la réparation (1 étant la marche la plus profonde et 5 la moins profonde). Les deux types de comportements thermiques simulés y sont aisément différenciables au travers de l'opposition de leur réponse thermique respective. Dans le premier cas, la faible conductivité thermique du joint isolant ralentit la propagation de la chaleur dans l'épaisseur et conduit à des variations de température relative positives  $\Delta T_2$ , supérieures à celle de la matrice époxyde. A contrario, dans le second cas, le joint de colle conducteur dont la conductivité thermique ( $\lambda = 1,13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) est supérieure à la conductivité thermique transverse du composite ( $\lambda = 0,51 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) induit des variations de température relatives  $\Delta T_2$  négatives. Le joint conducteur conduit donc davantage le flux thermique dans le sens X (sur toute la largeur des marches, Fig. 3) ainsi que dans l'épaisseur de la réparation collée (sens Z). Les variations de température  $\Delta T$  sont donc plus faibles en surface dans la zone d'influence du joint pour l'éprouvette réparée que celles obtenues pour l'éprouvette de référence. Un tel comportement semble donc particulièrement pertinent pour révéler la présence de défauts de collage. En effet, de telles irrégularités de collage, généralement constituées d'air au comportement isolant [6], auront tendance à accroître localement la variation de température relative  $\Delta T_2$ .

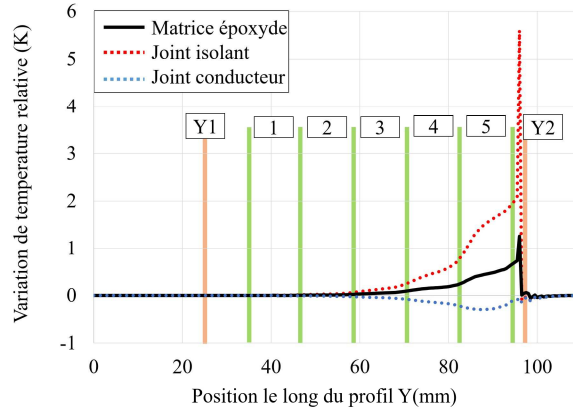


FIGURE 4 : Influence du comportement thermique du joint du joint - variation de température relative  $\Delta T_2(t_f)$  selon le profil Y

#### 4. ESSAI EXPÉRIMENTAL

Pour conclure cette analyse, la présence d'un défaut artificiel tel que le kiss-bonding a été reproduite expérimentalement au sein d'un joint de colle chargée. Pour ce faire, du nitrure de bore (BN,  $\rho = 2280 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\lambda = 300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [7] et  $C_p = 1610 \text{ J m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [8]), couramment employé pour modifier les propriétés thermiques des matériaux, a été ajouté à la matrice époxyde. Le mélange a pu être

optimisé pour une fraction volumique maximale de 18 %, une fraction plus élevée étant difficile à obtenir en raison de la forte viscosité du mélange. Cette configuration permet une augmentation de la conductivité thermique de la colle de 250 % ( $\lambda_{\text{colle chargée}} = 0,79 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Par ailleurs, deux défauts de cohésion ont été simulés par un collage partiel (Fig. 5), la colle chargée n'a donc volontairement pas été appliquée sur deux zones : l'une de petite taille au niveau de l'extrémité de la première marche (n° 5, prof. : 0,78 mm) ; l'autre sur la quasi totalité de la zone centrale de la marche (n° 4, prof. : 1,54 mm). Bien que la géométrie des défauts ne puisse être contrôlée précisément en raison du fluage de la colle lors de la pose du coupon supérieur, il convient cependant de noter que cette démarche correspond à une situation de défaut de collage réel.

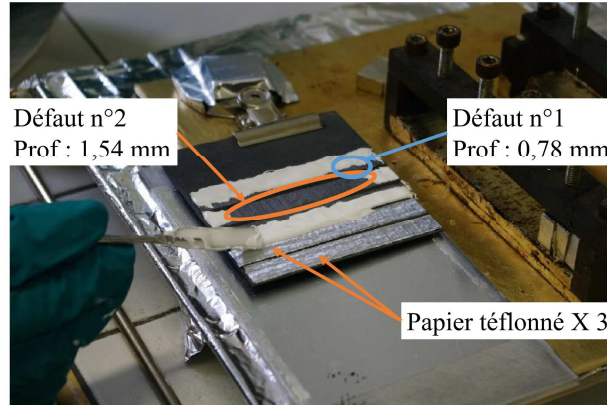


FIGURE 5 : Préparation d'une éprouvette réparée avec défaut de collage

Les résultats présentés par la Fig. 6 montrent clairement que la TIR active permet de détecter ces défauts de collage. En effet, le comportement isolant des défaut induit d'importants gradients de température locaux. Il est alors aisément possible de distinguer les défauts lors de l'étude des variations de température de surface  $\Delta T$  (Fig. 6-a). L'étude des variations de température relatives  $\Delta T_2$  est quant à elle encore plus concluante, avec des élévations locales de température de l'ordre de 1,3 K (défaut n° 1, le plus proche de la surface) et 0,7 K (défaut n° 2, Fig. 6-b).

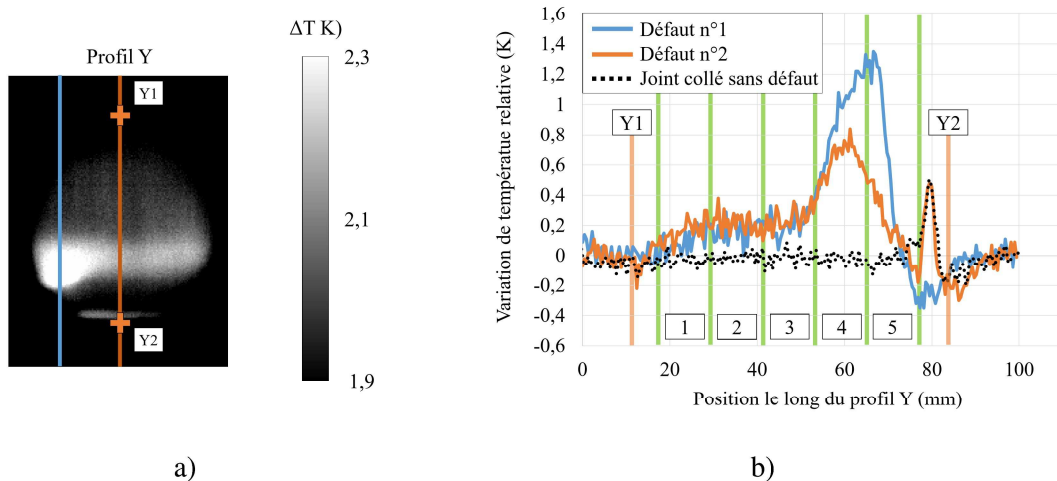


FIGURE 6 : Influence de la présence de défaut dans le joint de colle - Variation de température de surface  $\Delta T(t_f)$  (a), variation de température relative  $\Delta T_2(t_f)$  selon les profils de mesure verticaux (b)

## 5. CONCLUSIONS

Dans cette étude, l'influence du comportement thermique d'un joint de colle sur les variations de température surfacique  $\Delta T$  induites par une sollicitation thermique a été étudiée numériquement à l'aide d'un modèle par éléments finis. Cette démarche avait pour objectif d'investiguer la pertinence de l'utilisation d'un matériau joint conducteur en vue d'augmenter les contrastes thermiques (notamment entre le joint conducteur et les défauts isolants) et par conséquent d'améliorer la détection des défauts de collage dans une structure composite réparée. Du point de vue expérimental, les résultats de TIR active sur une réparation comportant un joint défectueux chargé en BN corroborent tout à fait les simulations numériques et démontrent l'intérêt de cette solution innovante. Un certain nombre de travaux restent encore à entreprendre pour améliorer cette réponse discriminante, par exemple en ce qui concerne la formulation du joint de colle (type d'additifs, morphologie des particules,...). Parallèlement, compte tenu du caractère structural de la réparation, l'étude de la tenue en statique et en fatigue du joint chargé constitue également une étape indispensable vers la certification.

## RÉFÉRENCES

- [1] X. Maldague, *Non destructive evaluation of materials by infrared thermography*. London (United Kingdom) : Springer-Verlag, 1993.
- [2] A. Baker, J. A. Gunnion, and J. Wang, "On the certification of bonded repairs to primary composite aircraft components," *The Journal of Adhesion*, vol. 91, no. 1-2, pp. 4–38, 2015.
- [3] M. Barus, H. Weleman, F. Collombet, M. Pastor, A. Cantarel, L. Crouzeix, Y. Grunevald, and V. Nassiet, "Bonded repair issues for composites : An investigation approach based on infrared thermography," *NDT&E International*, vol. 85, pp. 27–33, 2017.
- [4] R. Zitoun and F. Collombet, "Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures," *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 3, pp. 858–866, 2007.
- [5] J. Li, P. Xue, W. Ding, J. Han, and G. Sun, "Micro-encapsulated paraffin/high-density polyethylene/wood flour composite as form-stable phase change material for thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 10, pp. 1761 – 1767, 2009.
- [6] R. Adams, "The non destructive evaluation of bonded structures," *Construction and Building Materials*, vol. 4, no. 1, pp. 3–8, 1990.
- [7] B. Zhu, J. Ma, J. Wu, K. Yung, and C. Xie, "Study on the properties of the epoxy-matrix composites filled with thermally conductive AlN and BN ceramic particles," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 118, no. 5, pp. 2754–2764, 2010.
- [8] Accuratus.com. (2016) Ceramic Materials and Ceramic Components.